

浅谈水电项目隧洞式过鱼池衬砌一体化施工技术

李国会 郭 晓

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810000

摘 要:随着水电站大坝的建成会阻断河流纵向连通,阻隔鱼类洄游、割裂水生栖息地,鱼道是水电工程核心生态补偿设施。在水电工程配套过鱼隧洞施工中,因鱼道隧洞“一洞两用”的特殊性,传统分块拼装模板、边墙与顶拱分步浇筑工艺存在工序割裂、现场人工投入大、衬砌成型错台多、施工周期长等短板,尤其过鱼池特殊过水断面兼具弧形顶拱与直立边墙复合结构,常规标准衬砌台车难以适配断面尺寸与过水防渗漏要求。为适配本工程隧洞式过鱼池异形衬砌施工需求,项目定制研发一体化全液压钢模衬砌台车,实现边墙、顶拱一次性整体浇筑,依托机械行走、液压自动调模脱模一体化系统简化现场工序。

关键词:隧洞式过鱼池;衬砌;一体化施工;水电工程

引言

西藏某水电站鱼道沿大坝右岸布置、由进鱼口段、单槽过鱼池段、隧洞式过鱼池段、鱼道穿坝段、出鱼口段等部位构成。鱼道沿过鱼池中心线的全长约为3031.10m。进鱼口段下游的鱼道过鱼池段主体为单槽,断面呈U型,距坝轴线下游垂直距离约650.0m处与隧洞式过鱼池段进洞口衔接。隧洞式过鱼池段布置于右岸山体内部,出洞口距坝轴线下游约126.0m,邻近右岸开挖边坡高程2805.00m马道的下游尾端。隧洞式过鱼池段出洞口与穿坝段之间过鱼池段为单槽。^[5]

1 一体化衬砌台车整体设计与核心优势

1.1 设备整体优势

一体化液压衬砌台车是完成过鱼池隧洞衬砌、模板精准定位与脱模的核心专用设备,依靠电机行走机构、多组液压油缸协同完成模板对位、尺寸微调及拆模作业。对比传统分层支模工艺、通用标准隧洞衬砌台车,本定制一体化台车适配过鱼池复合断面,综合经济效益与施工优势突出;单次衬砌成型速度大幅提升,浇筑完成后衬砌内壁平整度高,可减少后期人工打磨修补工序^[6]。台车单次循环浇筑分段长度设置为4m、4m、4.5m三段独立模段,现场可根据隧洞分段衬砌计划选择单段独立浇筑,或三段联动一次性完成长距离衬砌,灵活匹配不同施工区段的进度计划,适配过鱼池进转弯段等多种工况^[1]。

1.2 台车各分系统结构设计

一体化台车整体划分为模板成型系统、承载托架系统、横向平移调节机构、门架承重主体、有轨行走驱动

单元、侧向液压调节油缸、螺旋支撑千斤顶组六大核心模块,各模块协同受力,满足混凝土浇筑侧压力、设备自重双重荷载作用。

(1) 模板成型系统

模板断面由单块弧形顶模+左右对称两块直立边模组合成型,顶拱模板与侧边墙模板通过铰接销轴实现灵活开合,便于脱模作业。单块标准模板单元宽度统一设计为1.5m,依据过鱼池隧洞实际衬砌总长进行多节螺栓拼接组装;模板面板选用8mm厚碳素钢板,背部布设63×6等边角钢加强筋,筋条布设间距控制250mm,提升面板抗变形能力。模板板面预留一字型浇筑进料窗口,窗口沿隧洞纵向均匀排布,顶部中心位置预留混凝土泵送专用注浆接口,满足分层对称入仓浇筑需求。针对过鱼池防渗要求,模板拼接缝加装橡胶止水密封条,杜绝浇筑过程漏浆形成蜂窝缺陷^[4]。

(2) 托架承载系统

托架作为模板面板的直接承力构件,承接浇筑阶段混凝土自重、侧压力并通过竖向液压油缸、螺旋千斤顶将荷载传递至下方门架主体。托架由4根纵向承重主梁、两组横向边横梁、多道中间连接横梁与分层立柱焊接组成整体桁架,主梁采用焊接工字形截面型钢,横梁选用标准工字钢,整体承载力满足单次最大浇筑方量荷载^[7]。

(3) 横向平移调节机构

台车前后两端各布置一套独立平移调节单元,整套机构安装固定于门架边横梁上部。平移单元配套竖向液压油缸(型号GE220/120-300)与水平对中油缸(型号

GE125/63-400)；竖向油缸负责模板整体升降、脱模，竖向调节行程 200mm，可承载约 200t 模板与混凝土荷载；水平油缸用于校正衬砌中线与隧洞设计中心线重合度，左右双向可调行程 200mm，消除台车轨道铺设偏差带来的对中误差。

(4) 门架承重总成

门架为台车整体主要受力骨架，采用厚钢板焊接桁架结构，由纵向主梁、竖向承重立柱、横向连接横梁、斜向加固拉杆通过高强度螺栓拼接成型。门架纵梁采用箱型截面，立柱、横梁为工字形焊接构件；针对过鱼池隧洞净空高度较大特点，在立柱与横梁交接位置增设斜向支撑，提升整体刚度与抗侧移性能，避免混凝土浇筑过程门架扭曲变形^[3]。

(5) 主从动有轨行走机构

适配过鱼池隧洞洞内轨道运输条件，台车行走系统配置前端 4 套主动行走驱动单元、中段 8 套从动支撑轮组，全部铰接安装于门架纵向主梁下方。主动行走单元搭载 Y 系列六级三相异步电机，动力经一级齿轮减速、二级链条减速后驱动行走轮，行走轮直径 $\Phi 265\text{mm}$ ，空载标准行走速度 6m/min ；多台驱动电机同步启停控制，支持正向、反向双向行走，满足隧洞进退移位需求。轨道铺设采用 43kg/m 钢轨配套 200mm 宽木质枕木，轨道中心线与隧洞设计衬砌中心线偏差控制 $\pm 20\text{mm}$ 以内。

(6) 液压调节与螺旋支撑构件

1) 侧向液压油缸：台车左右对称布置侧向脱模油缸（型号 GE100/63），工作油压额定 16MPa，油缸最大推力 11t、最大拉力 6.6t，浇筑阶段起到侧向支撑模板、脱模阶段拉动边模脱离衬砌面双重作用，适配过鱼池高侧压力边墙结构。

2) 侧向螺旋千斤顶：安装于门架立柱两侧，浇筑前旋紧顶紧模板，分担侧向油缸受力，抵抗混凝土侧向挤压荷载，螺杆直径 80mm，可人工微调支撑长度。

3) 托架支撑千斤顶：布置于托架纵梁下方，优化托架受力分布，防止浇筑过程托架局部下挠变形，螺杆直径 100mm，调节行程 400mm。

4) 门架底部支撑千斤顶：直接顶撑于钢轨枕木上方，承担台车自重与混凝土浇筑总荷载，分散门架纵梁集中应力，作业阶段必须全部旋紧顶实，螺杆调节行程 200mm。

1.3 机械、液压、电气一体化控制系统

(1) 机械行走传动系统

台车行走依靠前后两组独立机械传动总成，每套总成包含驱动电机、齿轮减速器、传动链条，多组电机同步启动保证行走同步性，可根据洞内施工空间灵活切换前进、后退模式；轨道坡面存在打滑情况时，可在轨面铺设干细砂增大轮轨摩擦力，保障移位稳定。

(2) 液压控制系统

整套液压系统采用分体式液压动力站，搭配三位四通手动换向阀控制各油缸伸缩动作；竖向升降油缸加装双向液控单向锁阀，浇筑作业时自动锁死油缸，防止模板沉降；侧向、平移油缸管路串联单向节流阀，精准控制油缸伸缩速度，避免模板快速移动造成磕碰、错位。换向阀中位具备系统卸荷功能，降低液压油温，延长液压油使用寿命；管路集成直回式滤清器，减少油路杂质堵塞故障。系统分区独立控制：上部顶拱侧向油缸单独一组换向阀，下部边墙两侧油缸分四路独立控制，前后平移油缸单独操作，分区调控便于分段校正模板尺寸。

(3) 电气控制系统

采用三相五线制安全供电线路，控制柜集成行走电机启停、正反转控制、油泵电机开关及过载保护装置；电机过载、缺相时自动断电停机，避免设备烧毁；操作面板布置于台车两侧操作平台，配备急停按钮，满足洞内紧急停机安全需求。

2 一体化台车现场标准化施工工艺流程

本台车为过鱼池隧洞定制非标衬砌设备，所有工序需严格遵循设计参数开展，完整施工循环流程为：施工前期检查 → 设备调试 → 洞内钢筋绑扎 → 台车行走就位立模 → 端头封堵处理 → 混凝土分层浇筑 → 混凝土恒温养护等强 → 液压脱模 → 台车移位养护^[2]。

2.1 施工前期准备与设备调试

台车进洞施工前完成全方位检查：核对各模板、桁架、油缸、千斤顶构件规格与设计图纸一致，所有连接螺栓二次紧固；检查液压油液位、油质，无浑浊、渗漏；电气线路绝缘完好，电机、控制柜无破损。同步完成洞内轨道铺设验收：枕木间距、钢轨平整度达标，轨道中线偏差控制规范范围内；清理隧洞基底杂物、浮渣，提前打磨前序衬砌接茬面，保证模板贴合无空隙；模板面板均匀涂刷水性脱模剂，避免后期衬砌表面粘模产生麻面。

2.2 台车行走就位与立模操作

台车沿轨道行驶至目标衬砌段后，先将门架底部支撑千斤顶全部旋紧顶实钢轨，锁死行走轮防止作业期

间台车滑移；启动液压油泵，操作水平平移油缸校正台车中线，使模板拱顶中心线与隧洞设计衬砌中线完全重合；随后启动竖向油缸抬升托架，将模板整体抬高至设计高程，顶拱模板预留 10-20mm 预抛高，抵消混凝土浇筑沉降变形。水平、竖向尺寸校正完成后，人工旋紧全部侧向、托架螺旋千斤顶，形成多重刚性支撑；最后安装端头封堵模板，封堵缝隙采用海绵止水条填充，防止浇筑漏浆。

2.3 混凝土分层浇筑管控要点

立模验收合格后方可开展混凝土泵送浇筑，浇筑沿隧洞纵向与台车前进方向同步推进，横向遵循“两侧对称、由下至上”原则分层入仓。边墙浇筑阶段混凝土上升速率控制在 0.8m/h 以内，左右两侧混凝土液面高差不得超过 500mm，防止单侧侧压力过大导致模板偏移变形。浇筑过程中定时巡检所有螺旋支撑、液压油缸有无松动，出现丝杆滑移立即重新旋紧加固；混凝土输送泵管底部搭设马凳支撑，严禁直接压覆钢筋、堵头模板；浇筑至顶部进料窗口高度时关闭下层窗口，逐层向上浇筑，最终由拱顶注浆口完成封顶，封顶阶段降低泵送速度，实时观察通气孔压力，防止超压胀模。单次浇筑完成后，首次循环及每 3 次浇筑循环后，对台车全部连接螺栓、销轴进行一次全面复紧。

2.4 脱模与台车移位作业

混凝土达到设计规定脱模强度后方可开展拆模工序，严禁提前强制脱模破坏衬砌结构。脱模按“先侧模、后顶模”分步操作：拆除侧向螺旋千斤顶、端头堵头模板，启动侧向油缸收缩，使两侧边模板与衬砌面缓慢分离；分次收缩竖向液压油缸，降低托架与顶拱模板，全程禁止一次性快速收缩油缸造成衬砌边角崩裂；全部模板脱离衬砌面后，收起门架底部支撑千斤顶，解锁行走轮制动。台车移位前清理轨道两侧风管、水管等障碍物，确认隧洞前后无施工人员后方启动行走电机；台车完全静止后方可切换行走方向，移位过程配备专职人员全程观察轨道、轮组运行状态。

3 工程应用效益分析

针对过鱼池复合断面定制开发的一体化衬砌台车相比传统施工模式综合优势显著：

1) 质量效益：整体一次性浇筑消除边墙、顶拱分层浇筑形成的施工缝，大幅降低过鱼池隧洞后期渗水风险，衬砌内壁光滑无明显错台，减少防水修补工程量；

2) 进度效益：省去两次支模、拆模重复工序，单循环衬砌施工时长缩短 40%，适合过鱼池隧洞连续性施工；

3) 成本效益：钢模台车可循环周转 40 次以上，大幅减少木模板、脚手架耗材投入，现场模板支模、拆模人工数量减少 60%；

4) 安全效益：一体化机械化作业减少洞内高处搭设脚手架作业，降低高空坠落、模板坍塌安全隐患，洞内施工环境整洁，切实提高了文明施工标准。

4 结论

隧洞式过鱼池特殊结构断面衬砌一体化施工技术在西藏某水电站鱼道工程中的成功应用，突破了传统分层施工的技术局限，创新性研发并应用了适配特殊断面的一体化衬砌台车，有效解决了传统施工工艺中存在的分层接茬错台、分层止水施工复杂、施工工序繁多、施工效率低下等突出问题。该技术将边墙与边顶拱（含牛腿）的衬砌施工整合为一个整体，实现了一次性浇筑成型，不仅简化了施工工序、缩短了施工工期，还大幅降低了施工成本，同时有效提升了衬砌结构的整体性和密实性，解决了分层施工的接茬质量缺陷，保障了施工质量符合设计及规范要求。同时，该技术的应用，进一步完善了水电工程鱼道施工的技术体系，为同类隧洞式过鱼池衬砌施工提供了可复制、可推广的技术经验。

参考文献

- [1] 熊启钧等. 隧洞 (第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50666-2011 混凝土结构工程施工规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 王仁坤, 李鹏辉, 杨健. 水利水电工程隧洞衬砌施工技术 with 质量控制 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2020.
- [4] 张智, 李守义. 水工混凝土结构施工质量控制要点 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(08):145-150.
- [5] 长江科学院. 鱼道工程设计与施工技术研究 [R]. 武汉: 长江科学院, 2022.
- [6] 李桦. 液压钢模台车的结构、安装及应用 [J]. 贵州水力发电, 2005 (6).
- [7] 王春梅, 徐涛, 周仕强. 某隧道液压台车设计 [J]. 机床与液压, 2011 (1).